

运动系统多层递阶 自适应预报与控制

马洁 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



运动系统多层递阶 自适应预报与控制

马 洁 编著



机械工业出版社

本书给出了运动系统的定义,概述了基于参数模型预报和控制的典型方法,重点阐述了基于非参数模型的多层递阶辨识、多层递阶自适应预报和多层递阶自适应控制方法,并以船舶运动姿态预报和控制为例进行了仿真验证和对比分析。这些方法还可在其他类型的运动系统中应用。

本书阐述了动态系统故障预报的概念和基于多层递阶方法的化工系统故障预报应用实例。

本书对于航空、航天、船舶、军用车载系统、民用车辆及运动系统设备研制的工程技术人员和研究生具有重要参考价值,还可做为大专院校自动化、机电一体化等专业选修课教材。

图书在版编目(CIP)数据

运动系统多层递阶自适应预报与控制/马洁编著. —北京:机械工业出版社, 2009.10

ISBN 978-7-111-28316-4

I. 运… II. 马… III. 自适应控制器 IV. TM571.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第164883号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码 100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华 版式设计:张世琴

封面设计:赵颖喆 责任校对:陈延翔 责任印制:洪汉军

北京四季青印刷厂印刷(三河市杨庄镇环伟装订厂装订)

2010年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·12.5印张·243千字

标准书号:ISBN 978-7-111-28316-4

定价:30.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

运动系统在航天、航空、船舶及工业领域都大量存在，但是它们分别属于不同的行业或领域，其研究也是相对独立的。例如从运载火箭、载人航天飞船、卫星，到各种飞机，到水面舰艇、潜艇、水下潜器，再到陆地的各种军用车辆和民用车辆及其他相关设备等，都在不同的行业和部门进行研制生产，相互之间交流、借鉴以及探讨共性技术研发的工作相对较少。对于运动系统来说，其整体运动参数的预报是有效控制的前提，而准确有效控制又是系统完成各项任务的重要保证，所以，对运动系统的整体参数变化预报与控制进行研究具有重要的工程意义。运动系统预报技术与控制技术都属于共性技术，在某一运动系统中应用成功的预报和控制技术方法，有可能快速推广到其他类型的运动系统中去。

本书共分7章，第1章介绍运动系统的概念和国内外研究概况，系统预报技术和自适应控制技术所面临的问题和发展概况等；第2章介绍基于参数模型的系统控制方法；第3章介绍基于参数模型的系统预报方法；第4章系统地介绍多层递阶辨识、多层递阶自适应预报和多层递阶自适应控制理论；第5章和第6章分别阐述了控制和预报技术在船舶运动系统中的应用，并将各种方法与多层递阶理论的应用进行了比较研究；第7章是多层递阶方法在动态系统故障预报中的应用实例。

系统的预报与控制方法可分为两大类：基于模型的方法和基于数据驱动的方法。基于模型的方法已发展得十分成熟，但却存在应用的局限性；在难以建立系统机理模型的情况下，如何利用已获得的数据实现对系统的有效预报和控制是目前迫切需要解决的问题。黑龙江大学韩志刚教授提出了一种利用历史数据建立非线性系统的泛模型，并在此基础上建立了一套不依赖系统参数数学模型的自适应预报与控制理论多层递阶理论。

由于不同类型的运动系统在其运动状态下经常表现出非线性特性和时变特性等，对其运动参数进行的预报与控制时需要有适应性较强的方法，所以本书将多层递阶理论引入到船舶运动姿态预报与控制之中，还进行了仿真验证和对比分析，为进一步的工程应用提供技术支持和理论指导。

本书的编写工作得到了黑龙江大学韩志刚教授和北京交通大学侯忠生教授等的指导和帮助，他们无私地向作者提供了大量的文献、资料，在此表示衷心的感谢。

马 洁

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 运动系统概述	1
1.1.1 运动系统的定义与分类	1
1.1.2 研究概况	4
1.2 系统预报技术概述	5
1.2.1 预报方法的分类	5
1.2.2 各种预报方法的比较	7
1.3 自适应控制技术概述	8
1.3.1 线性系统的自适应控制	8
1.3.2 非线性系统的自适应控制	10
1.3.3 自适应控制理论的发展方向	13
第 2 章 基于参数模型的系统控制方法	15
2.1 控制系统的概念	15
2.1.1 系统的定义与分类	15
2.1.2 线性系统的性质	17
2.1.3 系统分析	18
2.2 控制论与工程控制论	19
2.2.1 控制论基本思想的形成	19
2.2.2 经典控制理论与现代控制理论	21
2.3 PID 控制	22
2.3.1 PID 控制原理	22
2.3.2 PID 参数对控制性能的影响	23
2.3.3 凑试法确定 PID 参数	23
2.4 极点配置	24
2.4.1 反馈控制系统的两种形式	24
2.4.2 极点配置的定理	26
2.5 模型参考自适应控制	28
2.5.1 模型参考自适应控制原理	28
2.5.2 基于超稳定性理论的控制器设计方法	29
2.5.3 基于李雅普诺夫稳定性理论的设计方法	31
第 3 章 基于参数模型的系统预报方法	35
3.1 时间序列分析与建模	35
3.1.1 随机过程的基本概念	35
3.1.2 动态系统的随机模型	40
3.1.3 基于最小二乘法的参数估计	46
3.2 自回归预报方法	49
3.2.1 自回归模型的参数估计	50
3.2.2 利用艾克准则确定自回归模型的阶	51
3.3 灰色预报方法	52
3.3.1 灰色系统的基本概念	53
3.3.2 GM 模型的建立	59
3.3.3 灰色预测步骤	66
第 4 章 多层递阶理论基础	68
4.1 系统建模与辨识	68
4.1.1 系统辨识的应用与发展	68
4.1.2 在线参数估计算法	70
4.2 多层递阶辨识	73
4.2.1 时变参数的辨识准则	74
4.2.2 参数未知的结构时变系统的辨识	75
4.2.3 多层递阶辨识方法	76

4.3 多层递阶自适应预报	77	概述	144
4.3.1 基本多层递阶预报方法	78	6.2 船舶纵摇运动 AR 模型法	
4.3.2 多模型多算法综合的多层		预报	147
递阶预报方法	78	6.2.1 自回归 AR 模型法建模	147
4.3.3 应用现状	83	6.2.2 船舶纵摇运动 AR 模型法	
4.4 多层递阶自适应控制与无模		预报应用实例	148
型自适应控制	85	6.2.3 仿真研究	150
4.4.1 多层递阶自适应控制	85	6.3 船舶纵摇运动多层递阶自	
4.4.2 无模型自适应控制	91	适应预报	152
4.4.3 应用现状	96	6.3.1 多层递阶自适应预报	
第 5 章 控制技术在船舶减摇系统		建模	152
中的应用	99	6.3.2 船舶纵摇运动多层递阶自	
5.1 船舶减摇装置与控制技术		适应预报应用实例	152
概述	99	6.4 AR 模型法与多层递阶自适	
5.2 控制技术在减摇水舱试验		应预报方法的应用比较	
装置中的应用	103	分析	153
5.2.1 减摇水舱试验装置工作		6.5 船舶纵摇运动灰色	
原理	104	预报	155
5.2.2 PID 控制的应用	114	6.5.1 对 GM (1, 1) 模型的改	
5.2.3 极点配置的应用	116	进算法	155
5.2.4 模型参考自适应控制的		6.5.2 船舶纵摇角数列数据的	
应用	122	处理	159
5.2.5 无模型自适应控制的		6.5.3 函数变换型 GM (1, 1) 模	
应用	129	型的建立	163
5.3 PID 控制、自适应控制和无		6.5.4 船舶纵摇角数列数据的	
模型自适应控制仿真结果的		还原	163
比较分析	133	第 7 章 多层递阶自适应预报	
5.4 大型船舶综合减摇系统无		方法在故障预报中的	
模型自适应控制	135	应用	166
5.4.1 大型船舶综合减摇系统的		7.1 动态系统故障预报技术	
组成	136	概述	166
5.4.2 大型船舶综合减摇系统		7.2 化工 CSTR 系统动态特性	
MFAC 控制器设计	137	分析	168
5.4.3 仿真分析	139	7.2.1 CSTR 系统工作原理	168
第 6 章 预报技术在船舶纵摇运动		7.2.2 CSTR 系统建模	169
中的应用	144	7.3 多层递阶方法在化工 CSTR	
6.1 船舶运动极短期预报技术		系统故障预报中的应用	171

7.3.1 基本多层递阶方法的 应用	171	系统简介	182
7.3.2 多模型多算法综合多层递阶 方法的应用	175	7.4.2 CSTR 系统故障预报实验 研究	187
7.4 实验研究	182	参考文献	191
7.4.1 多功能过程与控制实验		后记	193

第 1 章 绪 论

1.1 运动系统概述

1.1.1 运动系统的定义与分类

1. 运动系统的定义

运动系统是指能够在一维、二维、三维空间中发生位置或姿态变化的系统。这里描述的运动系统界定在人工的系统或非自然的系统，即经人类设计、加工、制造而成的系统（如汽车、飞机、船舶等），而不是自然形成的系统（如太阳、月球等，当然也不包括各种生物）。

在一维空间中变化的运动系统有：打桩锤、电梯等，它们都属于单轴向运动。在二维空间中变化的运动系统有：碰碰车等，它是在平面上运动。在三维空间中变化的运动系统有：在空中运动的飞机、导弹、人造地球卫星、载人飞船、航天飞机、航天站、空间探测器等；在地面、水面上运动的汽车、火车、坦克、各种舰船、汽艇等；在水下运动的潜艇、鱼雷、水下机器人等。

人们设计、制造运动系统是借助它来完成某种任务的。下面以在三维空间中变化的运动系统，如舰船和水下潜器为例，说明其运动特性。

(1) 舰船 它在水中三维空间中的运动是复合运动，可分解为 6 个自由度的运动，包括沿 3 个坐标轴的直线运动和围绕 3 个坐标轴的旋转运动。

纵荡运动：纵向位移、速度、加速度；

横荡运动：横向位移、速度、加速度；

垂荡运动：垂直方向位移、速度、加速度；

纵摇运动：纵摇角度、角速度、角加速度；

艏摇运动：艏摇角度、角速度、角加速度；

横摇运动：横摇角度、角速度、角加速度。

一般情况，对于舰船运动系统的 6 个自由度的运动变化，还难以实施全面的有效控制。人们只能对其中 3 或 4 个自由度的运动变化进行控制或干预，如图 1-1 所示。

1) 对纵向运动进行控制。通过向主机发出控制指令，使舰船前进或后退，还可以对前进或后退速度或加速度进行控制。

2) 对航向变化进行控制。通过向舵机发出控制指令,使舰船的航行方向按需要进行调整、变化。

3) 对风浪造成的横摇进行干预。通过对舰船加装的减摇鳍或减摇水舱等装置进行控制,可以大幅度地减小横摇,提高舰船航行的平稳性和适航性。

4) 对风浪造成的横荡进行干预。通过对舰船加装的侧推螺旋桨进行控制,可以大幅度地减小横荡,满足舰船在风浪中定点停泊在某一位置的需求。

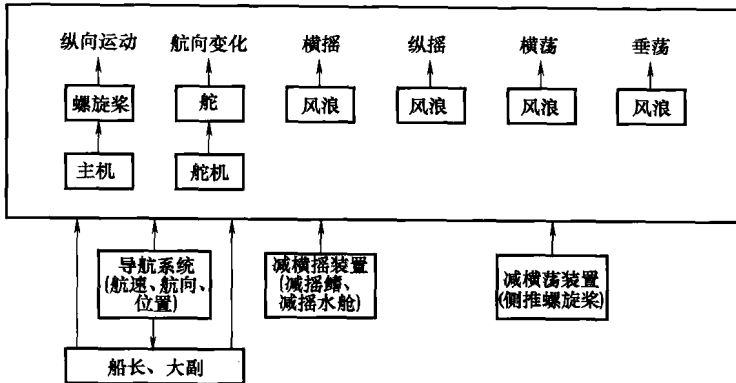


图 1-1 舰船运动系统框图

目前,对横向运动的控制技术以及对航向的控制技术已经相当成熟,并且能够较好地满足实际需要。其中对于横摇的控制,近 20 年来已取得较大的进展,但在一些特殊情况和复杂海况下还难以达到较好的控制效果。对于横荡的控制,由于加装侧推螺旋桨的舰船较少,从事这方面的研究成果也较少。对于纵摇和垂荡,人们尚未研制出有效的控制装置。

(2) 水下潜器 它在三个轴向都安装推进螺旋桨,即纵向安装主推螺旋桨,用于实现前后运动;横向安装侧推螺旋桨,用于实现横向运动;垂直方向安装垂推螺旋桨,用于实现上下运动。具有这种推进装置的水下潜器可以在水中按照人们的意愿实现灵活的前进、后退,向左、向右的横向运动,向上、向下的垂直运动等。而且在 x 、 y 、 z 三个轴向的螺旋桨同时工作时,只要由控制器按照预定程序或设定值进行工作,便可以使潜器在水下三维空间中进行复杂的运动。

2. 运动系统的分类

能够使运动系统发生位置或姿态变化的关键要素是系统的动力驱动机构和控制器。根据能量守恒定律,系统发生位置变化应当由力来驱动,动力驱动机构就是使系统发生位置变化的力量来源。使系统按照人们的意愿或某种规律进行运动的核心,就是系统的控制器,控制器可以接受来自人的指令或按照预定的控制程序运行,控制的结果即为系统期望的运动。控制器通常对动力驱动机构发出控制指令,使动力驱动机构为系统运动提供所需方向的力量。

在某种控制或动力驱动作用下，运动系统的姿态或运动轨迹可呈现出多种变化。一般来说，运动系统可分为规则运动系统和任意运动系统两种。

规则运动系统的姿态变化或运动轨迹的变化是按照某种规律或预先设定的期望特性运动的（即变化具有规则性）。例如火车、地铁、数控机床等，都属于规则运动系统。

任意运动系统的姿态变化或运动轨迹的变化既可以是规则的，也可以是不规则的（即变化具有任意性）。例如人们驾驶的汽车、坦克、飞机、舰船等，都属于任意运动系统。

规则运动系统的姿态变化或运动轨迹呈现一定的规则性，其变化特性、输入、输出关系可用相应的数学模型较为准确地描述。

任意运动系统的姿态或运动轨迹呈现出随机性，其变化特性具有不确定性，其关系很难用相应的数学模型较为准确地描述。

例如在地面上行驶的车辆，一类为被完全约束在预先设置于地面的轨道上行驶的车辆，如铁路车辆，属于规则运动系统；另一类为不受轨道约束，自由在地面上行驶的车辆，如汽车等，属于任意运动系统。

任意运动系统，例如车辆运动按三维空间中的刚体运动可分解为以下6个自由度的运动：

z 向的平动：上下运动；

y 向的平动：侧向运动；

x 向的平动：纵向运动；

绕 x 轴的转动：侧倾运动；

绕 y 轴的转动：俯仰运动；

绕 z 轴的转动：横摆运动。

具体地说， z 向的平动是由于路面不平整等原因产生的上下方向的运动，它关系到行驶中车辆的乘坐舒适性； x 向的平动为纵向的直线运动，包括由于加大油门或刹车所产生的车辆驱动或制动等；绕 y 轴的转动为由于路面的不平整及伴随着 x 向的平动而产生的运动，它也关系到车辆的乘坐舒适性。

y 向的平动和绕 z 轴的转动则基本上是由于对行驶中车辆进行转向操纵才产生的运动。其中， y 向的平动为由于转向操纵而产生的车辆侧向运动；绕 z 轴的转动为车辆方向因转向操纵而发生变化的运动。这种运动也会因路面不平整而产生。

3. 研究意义

为了使运动系统按人们的意愿完成某种任务，就要求运动系统按指定的轨迹（航迹、路线）和姿态运动。一般而言，没有控制器的运动系统其运动轨迹和姿态变化都是不能令人满意的，通常它们的实际运动轨迹和姿态与期望的运动轨迹

和姿态相差较大,这种差别经常会大到使运动系统无法实现指定的用途或完成指定的任务。因此,有必要对运动系统自身的运动特性进行充分的了解,进而根据对运动系统运动特性期望值的要求进行控制器的设计,使运动系统的运动特性达到令人满意的程度。

例如,对于三维空间中的运动系统(如飞机、舰船)的运动特性的研究将有助于人们开发无人驾驶飞机和无人驾驶舰船等智能的控制器。针对水下潜器的运动建模、预报与控制的研究,将有助于人们开发自主式水下机器人和无人驾驶潜艇等智能的控制器。而且对于开发无人驾驶水面舰船和无人驾驶飞机等智能控制器也具有借鉴意义。

1.1.2 研究概况

运动系统是军事和民用领域常见的系统,其种类非常多、应用非常广,所以许多国家都非常重视对运动系统的研究。

美国是运动系统研究投入最大、技术最先进、取得成果最多的国家。例如航天飞机、太空运行的飞船、各种卫星、波音系列客机、隐形战斗机和轰炸机、全球鹰无人侦察机、大型核动力航母、宙斯盾导弹驱逐舰、弗吉尼亚级核潜艇、战斧式巡航导弹、爱国者导弹、各种新型坦克和战车等。

俄罗斯对于运动系统的研究在许多方面也居世界前列。例如载人航天飞船、全球导航卫星、苏系列和米格系列战斗机、具有全球续航攻击能力的战略轰炸机、现代级导弹驱逐舰、攻击力极强的核潜艇、白杨—M 洲际战略导弹、S—300 导弹、深水潜器等。

欧盟各国对于运动系统的研究也取得了许多令人瞩目的成绩。例如英国的 LR 系列潜艇救生艇、德国的新型柴电潜艇、瑞典的 AIP 动力潜艇、英国的新型核潜艇、空客系列飞机、法国的中型航母、德国的奔驰系列和宝马系列轿车等。

日本对于运动系统的研究也有许多独到之处。例如丰田系列混合动力汽车、水下机器人、春潮级潜艇、金刚级导弹驱逐舰等。

各国在武器装备和工业产品方面的研制与生产水平也反映了其综合国力,而运动系统大多又是技术密集、具有代表性的产品,在许多领域具有不可替代的作用,所以,加强对运动系统的研究具有重要的意义。

自从新中国成立以后,我国十分重视运动系统的研制,“两弹一星”、核潜艇等就是代表性成果。潜深 6000m 的水下机器人、神舟系列飞船、歼—10 战斗机等都已达到世界先进水平。

尽管近年来世界各国对运动系统的研究取得了长足的进展,但是距离人们的理想要求还有相当大的差距。例如战斗机和轰炸机还没有实现全智能控制(无人驾驶),水面舰艇和潜艇也没有实现全智能控制(无人驾驶),就连无人驾驶汽车

的研究也没有达到实用水平,工业机器人和 underwater 机器人的智能控制也只处于初、中级水平,距离真正意义的“智能”,还有相当大的差距。

因此,持续不断地研究新的、更高性能指标的运动系统,既有利于满足国防和民用领域的需求,也有利于人类科学技术的创新,使人们在几十年或更长时间以后能够利用具有较高智能的运动系统完成更为复杂的任务。

研究智能型运动系统的关键技术是实现系统运动准确的姿态预报和有效控制。本书着重探讨运动系统的姿态预报和控制方法,并针对运动系统的非线性、参数时变性特点引入多层递阶理论进行相应的预报和控制研究。目前,尚未见出版应用多层递阶理论研究运动系统的预报与控制的专著或教材。

1.2 系统预报技术概述

1.2.1 预报方法的分类

据有关资料表明,目前国际上已有二百多种预报方法。预报方法大致分为两大类,即基于参数模型的预报方法和基于非参数模型的预报方法,见文献 [1]。

1. 参数模型的预报方法

这类预报方法通常是先用系统辨识的方法获得系统数学模型,然后,依据此模型和观测数据来预报系统未来时刻的运动状态。

这类方法的理论依据是:设 $\hat{x}(k+l)$ 为 $x(k+l)$ 的预报,其中 $k=1, 2, \dots$, 为预报步数,预报性能指标为

$$J = E\{[x(k+l) - \hat{x}(k+l)]^2\}$$

当 J 为最小时,将 $\hat{x}(k+l)$ 称为 $x(k+l)$ 的最优预报,其中 $E\{\cdot\}$ 表示数学期望。

(1) Box-Jenkins 方法 Box Gep 和 Jenkins G.M. 早在 1970 年就给出了一种离散线性定常系统的预报方法。

若系统动态特性服从如下的 ARMA 模型

$$x(k) = a_1x(k-1) + \dots + a_nx(k-n) + e(k) + c_1e(k-1) + c_2e(k-2) + \dots + c_me(k-m)$$

则 $k+l$ 时刻预报值为

$$\hat{x}(k+l) = \sum_{i=1}^n \hat{a}_i x(k+l-i) + \dots + \sum_{j=1}^m \hat{c}_j e(k+l-j)$$

(2) Aström 预报方法 若系统的动态特性服从 ARMA 模型, Aström 给出了另一种预报方法。

设系统的数学模型为

$$A(q^{-1})y(k) = C(q^{-1})e(k)$$

则对 $k+l$ 时刻预报值为

$$\hat{y}(k+l) = \frac{G(q^{-1})}{C(q^{-1})}y(k)$$

其中

$$\frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})} = F(q^{-1}) + \frac{G(q^{-1})}{A(q^{-1})}$$

(3) Kalman 滤波预报方法 当系统的状态空间模型为

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bw(k) \\y(k) &= Cx(k) + v(k)\end{aligned}$$

则 Kalman 滤波算式为

$$\hat{x}(k) = A\hat{x}(k-1) + K(k)[y(k) - AC\hat{x}(k-1)]$$

其中

$$\begin{aligned}K(k) &= P(k-1)C^T[CP(k-1)C^T + R]^{-1} \\P(k-1) &= AP(k-1)A^T + BQB^T \\P(k) &= [I - K(k)C]P(k-1)\end{aligned}$$

可以看出 Kalman 滤波方法可以解决多输出系统的预报问题。

(4) 灰色系统预报方法 华中科技大学邓聚龙教授于 20 世纪 70 年代末、80 年代初提出的灰色系统理论目前在很多领域中得到了应用。灰色系统预报方法主要有两类,一类是基于灰色系统动态模型 GM 的灰色预报模型方法。这类方法的特点是根据自身数据建立动态微分方程再预报自身的发展。它的短期预报精度很高,但在多步预报时精度降低。另一种是基于残差信息开发与利用的数据列残差辨识预报模型方法,这类方法简单,精度高,适用于摆动幅度不大的非平稳随机过程的预报,其残差利用率高。

2. 非参数模型的预报方法

(1) 多层递阶自适应预报方法 多层递阶自适应预报方法是黑龙江大学韩志刚教授运用现代控制理论中的系统辨识方法而创建的一种新的动态系统预测方法。

多层递阶自适应预报方法是一种非线性系统的自适应预报方法,其基本思想是充分注意到预报模型的时变特性,把预报问题分成为两部分,即对预报模型时变参数的预报和在此基础上得出的预报对象的预报^[2]。

自 20 世纪 80 年代初首篇论文正式发表以来,已引起国内外专家学者和科学技术人员的极大兴趣和广泛关注,并在气象预测、经济预测、社会预测等众多领域的实际应用中获得了成功。

(2) 专家系统预报方法 预报专家系统主要由三部分组成,即知识库、推理

机和用户接口。知识库通常分为数据库和规律库两部分。知识库中存储着从行业专家那里得到的有关预报的事实与规则。推理机具有根据知识库中的知识, 预报系统未来运动状态的功能。

当对系统的动态特性了解得不充分, 或者对问题的求解没有明确算法时采用专家系统是十分有效的。1988年, K. Jabbur 介绍了一个用于电网负荷预报的专家系统。该系统数据库中存放着十年的负荷数据, 而有关预报的专家经验及气候变化对负荷的影响都以规则的形式表示并存放在规则库中。推理机根据一些事实(包括这一天是在哪个月, 是星期几, 是否节假日以及气象预报结果)和规则进行推理, 预报未来1至48小时的电网系统的负荷。我国在预报型的专家系统的研究与应用方面也取得了不少可喜的成果。例如北京理工大学和国家气象局联合研制的气象专家预报系统 IMFOS, 在气象预报中取得显著的成果。

(3) 人工神经网络预报 人工神经网络是对生物神经系统的模拟, 其数学基础是逼近论。逼近论的基本问题是用简单表示复杂, 例如用多项式来近似任意的连续函数。该方法把过去一段时间内的历史数据作为网络输入, 让网络进行学习, 并通过一些规则对各神经元间的连接权和神经元的域值进行调整, 使得对于给定的一系列网络输入, 都能得到期望的网络输出, 即正确的预报值。该方法的优点是只要给网络一定的学习样本, 通过训练, 网络可以自主地找出映射规律, 从而给出期望输出, 这样就可以省去数据分析和建模过程, 对问题的处理带来了很大方便。

近十几年来, 神经网络理论的应用和发展非常迅速, 由于其不需要对系统模型做假设, 因此有着比基于参数模型的预报方法更广泛的应用范围, 如国内已经有人把这一方法用于舰船运动姿态预报研究中, 预报时间可达5~7s。

1.2.2 各种预报方法的比较

在上述的预报方法中, 1970年 Box 和 Jenkins 提出的 Box-Jenkins 递推预报方法, 1976年 Astrom 提出的基于 Diopantine 方程的预报方法和 Kalman 滤波预报方法, 都是基于模型的非自适应预报方法, 这类方法在应用中都有一定的缺陷。主要表现是预报误差较大, 而且, 误差随着预报区间的增大而迅速增大。究其原因主要有两方面: 一是依赖系统的数学模型, 若模型越精确, 预报的结果就越精确。实际上模型总是近似的。二是用来建立模型的辨识方法本身的问题。在上述方法中主要是用最小二乘法辨识方法来建立模型, 而最小二乘法主要对常系数系统有效, 即使改进的最小二乘法也只是对参数慢时变的系统有效。

以往处理时变系统的预报问题往往是用定常系统去近似时变系统, 然后用定常系统的预报方法来预报时变系统的某一状态。这样必然存在很大的误差。由韩志刚教授提出的多层递阶自适应预报方法是一种基于数据驱动的预报方法。多层

递阶方法在输入输出等价的意义下,能把一类非线性模型化成多层线性模型,由于其充分注意参数的时变特性,因而利于解决时变系统预报问题。另外,仅用观测数据,不需要事先建立好精确的数学模型,一边辨识,一边建模,数据与模型间具有动态自适应的特点,模型与数据能够最佳匹配。

解决非线性系统的预报问题,神经网络预报方法也是一种有效的方法。

突变问题的预报目前还没有很好地解决,比如灾害性天气、地震等问题的预报就是突变状态的预报问题。由于发生突变时,系统的运动特性往往发生了质变。目前解决这类问题比较流行的方法是采用专家系统预报方法。

1.3 自适应控制技术概述

当被控对象模型结构和参数已知时,称为确定性系统,对于这类系统,一般采用常规反馈控制和最优控制等方法就可以得到满意的控制效果。然而,实际系统事先要求其被控对象模型结构和参数已知几乎是不可能的,面对众多的具有较强不确定性的被控对象,如何设计一个令人满意的控制器就是自适应控制的任务。

“自适应”的含义就是改变自己的行为以适应新的环境。自适应控制器应该能改变其控制作用以适应过程动态的改变或环境的扰动。由于自适应控制的对象是那些存在不确定性的系统,这种控制应在控制系统运行过程中,不断地测量被控过程的输入、状态、输出或性能参数,从而逐步了解和掌握被控对象,根据所得的过程信息,按照一定的设计方法,做出控制决策,去更新控制器的结构、参数或控制作用,以便在某种意义下使控制效果达到最优或达到某种预期目标。按照此思想建立起来的控制系统就是自适应控制系统。因此,自适应控制的显著特点有两个:一是控制的过程具有某种不确定性,即过程的特性有某些未知或不确定的部分;二是控制系统的适应能力表现为控制过程中系统的不确定性不断减弱。

1.3.1 线性系统的自适应控制

自20世纪50年代Kalman提出调节器的概念以来,线性系统的自适应控制理论与方法得到了很大发展,相继有许多专著出版,并且已经得到了广泛的应用。线性系统的自适应控制方法主要包括:

1. 增益程序(调度)控制

增益程序(调度)控制(Gain Scheduling)的工作原理是根据能测量的系统辅助变量,直接查找预先已列好的表格来调整调节器的参数,去补充系统参数的变化的影响。这种系统设计的关键是找出合适的辅助变量,根据系统运动规律,

通过程序求出辅助变量与调节器参数之间的关系，用以改变调节器的增益。因此，这种方案的缺点是在设计增益补偿表时很费时间，工作方式是开环的，参数调整方案必须在各种工况下一一调试决定。其优点是结构简单，反应快，可使反馈系统迅速响应过程的变化，如图 1-2 所示。

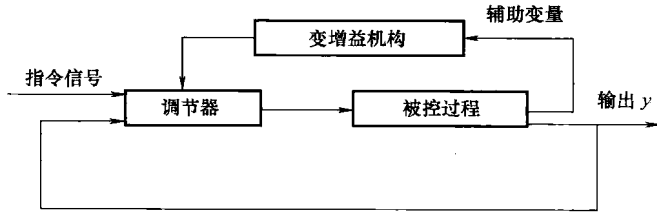


图 1-2 增益程序（调度）控制原理框图

2. 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应控制系统（Model Reference Adaptive System）的原理框图如图 1-3 所示。它由两个控制回路组成：内回路是由调节器和受控过程组成的普通反馈回路；外回路则由参考模型和自适应机构组成。参考模型代表受控过程应该具有的理想特性。当被控过程由于外界环境或工作状态的改变使其动态特性偏离了期望的状态时，则被控对象的输出与参考模型的输出相比较产生误差 $e = y_m - y$ 。模型参考自适应控制系统设计的关键是确定调整机构，修改调节器的参数或产生一个辅助的控制信号，使可调系统和参考模型的输出误差最小，以此来达到模型跟随控制的目的。

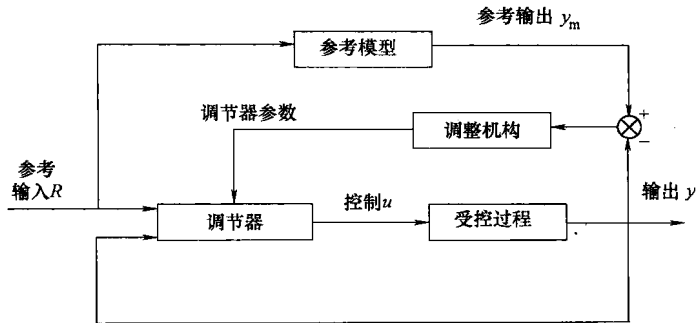


图 1-3 模型参考自适应控制原理框图

3. 自校正调节系统

自校正调节系统（Self-Tuning Control）的原理框图如图 1-4 所示，它也被称为参数自适应控制系统。这类自适应控制系统的一个主要特点是具有被控过程的在线辨识环节，它由两个控制回路组成：内回路是常规线性反馈回路；外回路则负责调整调节器参数，由参数估计器与调节器设计算法所组成，前者执行过程

参数的递推估计任务，后者则根据前者的结果和一定的规则进行在线设计计算。

自校正控制系统在运行过程中，根据被控对象的输入输出数据，利用递推参数估计算法实时估计被控对象或者控制器的参数，然后根据被控对象的参数估计值进行控制器的参数计算，并根据控制器参数计算的结果，修改控制器的参数，再通过控制器输出控制信号对被控对象施加控制，以消除被控对象参数变化对系统性能的影响，使控制效果最终达到某一预定的目标。

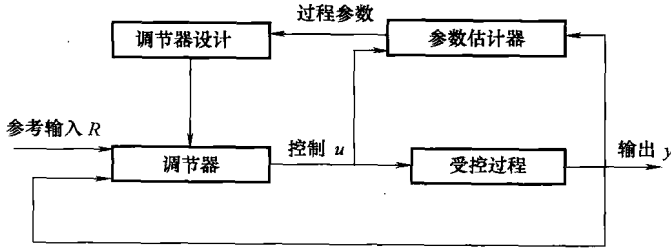


图 1-4 自校正调节系统原理框图

4. 自学习系统（也称为直接优化目标函数的自适应控制）

这种自适应控制方案的构思比较简单：设想自适应控制系统中的调节器为 $R(\rho)$ ，其中 ρ 是可以调节的参数，自适应控制的目的是使得某一准则函数达到极小，于是可调节参数 ρ 的计算就是按照使得准则函数极小化的方向进行。这方面的研究成果目前比较少。

1.3.2 非线性系统的自适应控制

非线性系统的自适应控制是当前控制理论的热点研究问题之一，富有挑战性。由于实际系统基本上都是非线性的，因此研究非线性系统的自适应控制无论在理论上还是在实际应用中都具有重要意义。

从上述几种线性系统自适应控制的基本思想可见，这些方法的思路均是建立控制系统的数学模型、分析其数学模型、依靠数学模型寻求控制律，被称为是基于参数模型的自适应控制。

依靠数学模型设计控制器是十分困难的。对于某些复杂的系统，如机器人控制系统、化学反应过程、炼钢炉温度控制系统等，根本无法建立其数学模型。通常意义下的建模，也只是对系统的某种程度的近似，有时许多系统动态未能建立到模型中去，这样的建模就给系统在实际应用过程中，带来很多问题，如不稳定、对某些参数太敏感（即鲁棒性问题）等。另外，还要求设备精良，费用昂贵。

要想真正解决非线性系统的自适应控制问题，就必须打破线性系统自适应控制的思路，寻求一条新的非线性系统自适应控制的出路，即摆脱对被控系统数学